



Fundamentos Físicos y Tecnológicos de la Informática

“El transistor MOS”

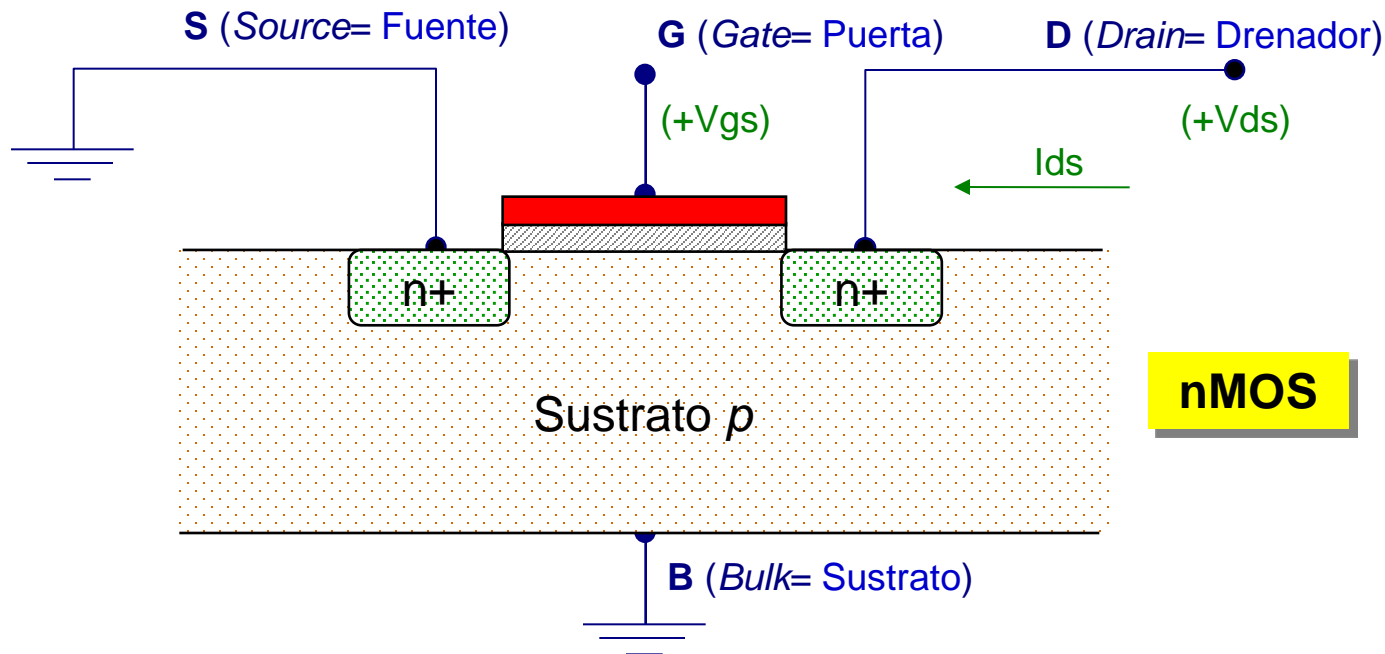
- Características del transistor MOS. Estructura y geometría del transistor MOS. Polarización.
- Tipos de transistores MOS. Simbología.
- Modelo en continua. Curvas características.

Agustín Álvarez Marquina

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos

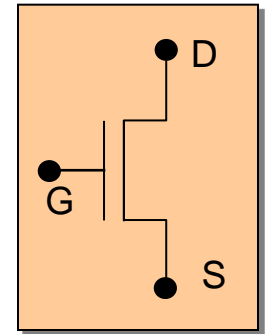
Universidad Politécnica de Madrid

Estructura física y polarización del transistor nMOS de acumulación



nMOS

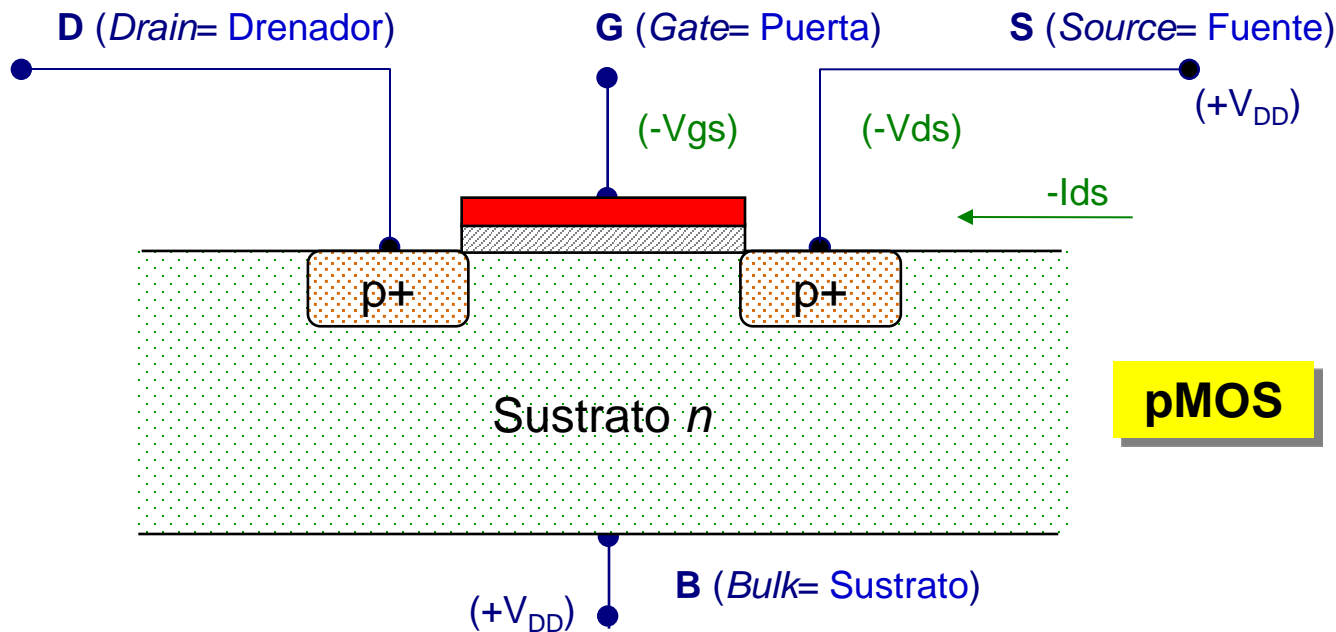
Símbolo



V_{gs} es la tensión entre los terminales de puerta y fuente.

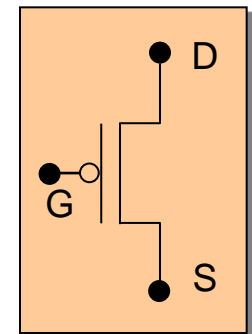
V_{ds} es la tensión entre los terminales del drenador y la fuente.

Estructura física y polarización del transistor pMOS de acumulación



pMOS

Símbolo



V_{gs} es la tensión entre los terminales de puerta y fuente.

V_{ds} es la tensión entre los terminales del drenador y la fuente.

Formación del canal en el transistor MOS (I)

○ Formación del canal (transistor nMOS)

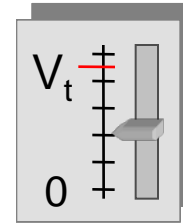
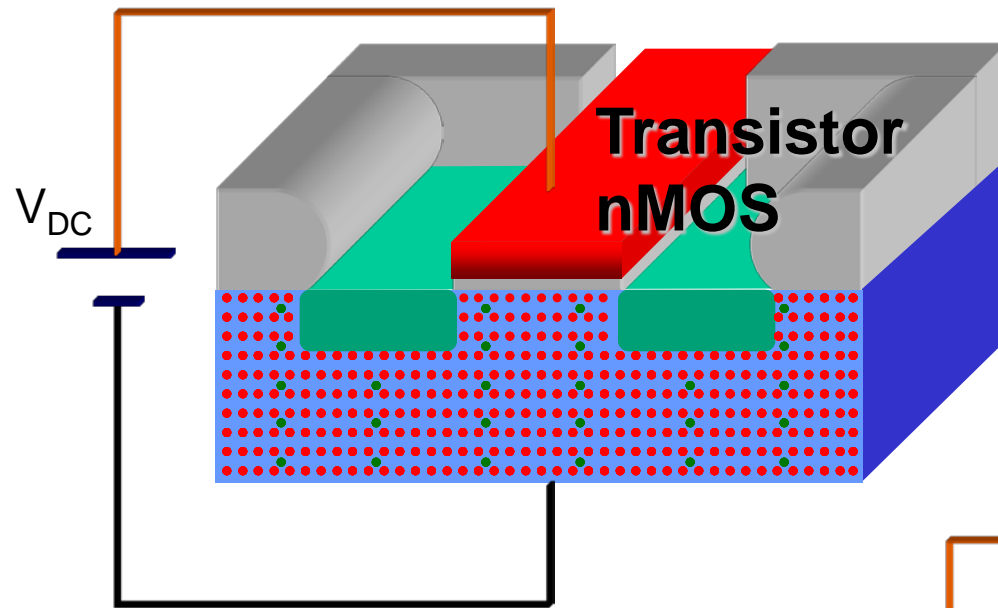
- ❑ Cuando se polariza con una tensión positiva en puerta respecto al sustrato de tipo p...
 - Comienza a inducirse un despoblamiento progresivo de huecos en la zona inmediata a la superficie del semiconductor debajo del óxido de puerta.
- ❑ Si se sigue aumentando la tensión positiva en puerta...
 - Se van acumulando electrones (minoritarios en el sustrato de tipo p) presentes en todo el semiconductor debido a la rotura espontánea de enlaces.

Formación del canal en el transistor MOS (II)

○ Tensión umbral V_t

- Es la diferencia de potencial entre puerta y sustrato a la que comienza a formarse el canal.
- La aplicación de una tensión de polarización suficiente consigue de este modo invertir la polaridad de la carga habitual en la zona inmediatamente debajo del óxido de puerta.

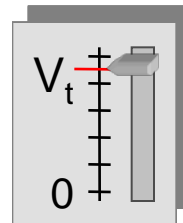
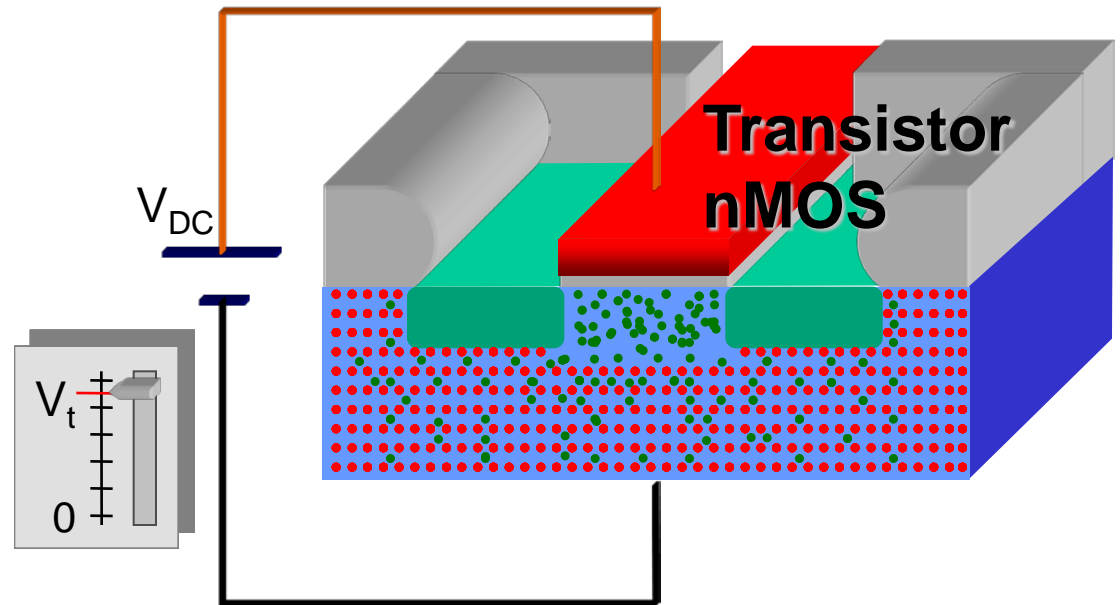
Tensión umbral del transistor MOS



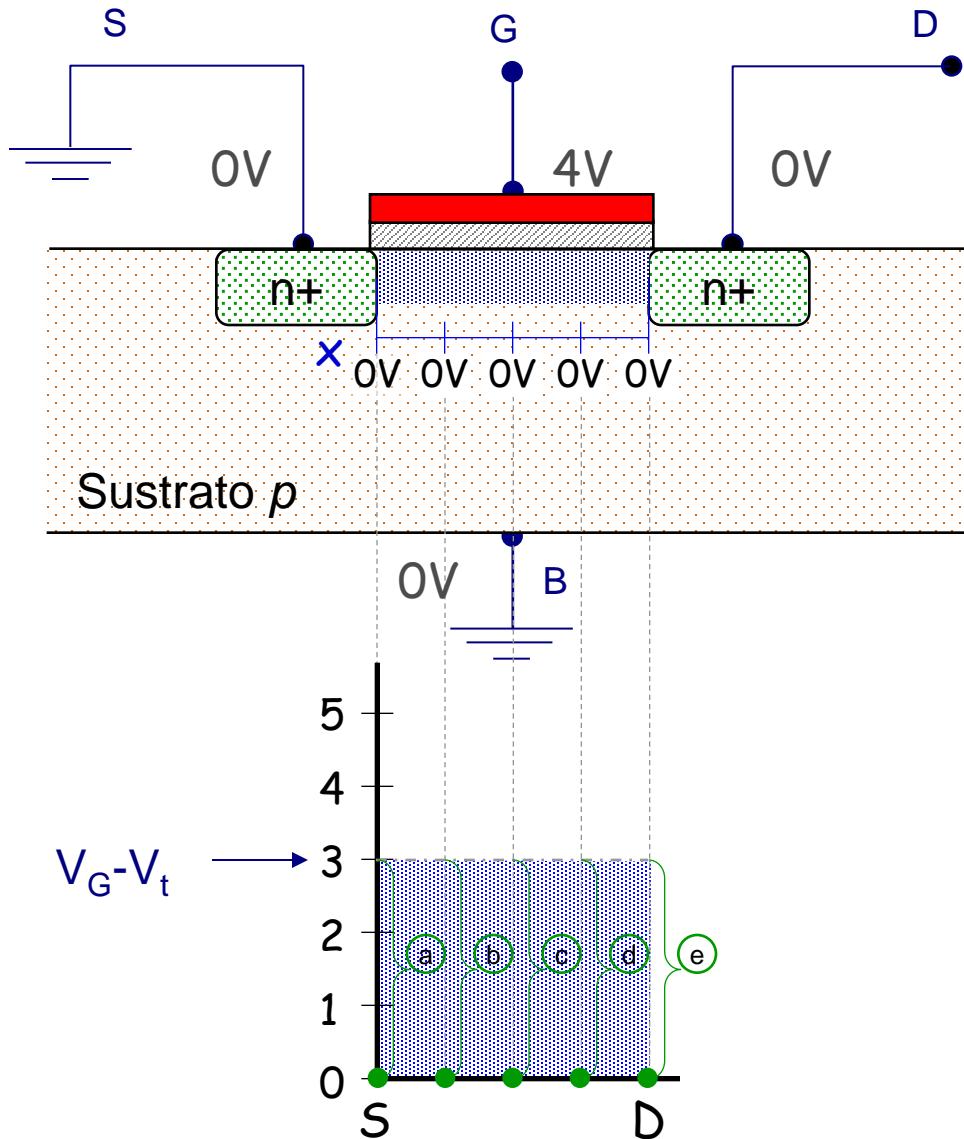
Vaciamiento

- Huecos
- Electrones

Inversión



Perfil del canal. Análisis cualitativo (I)

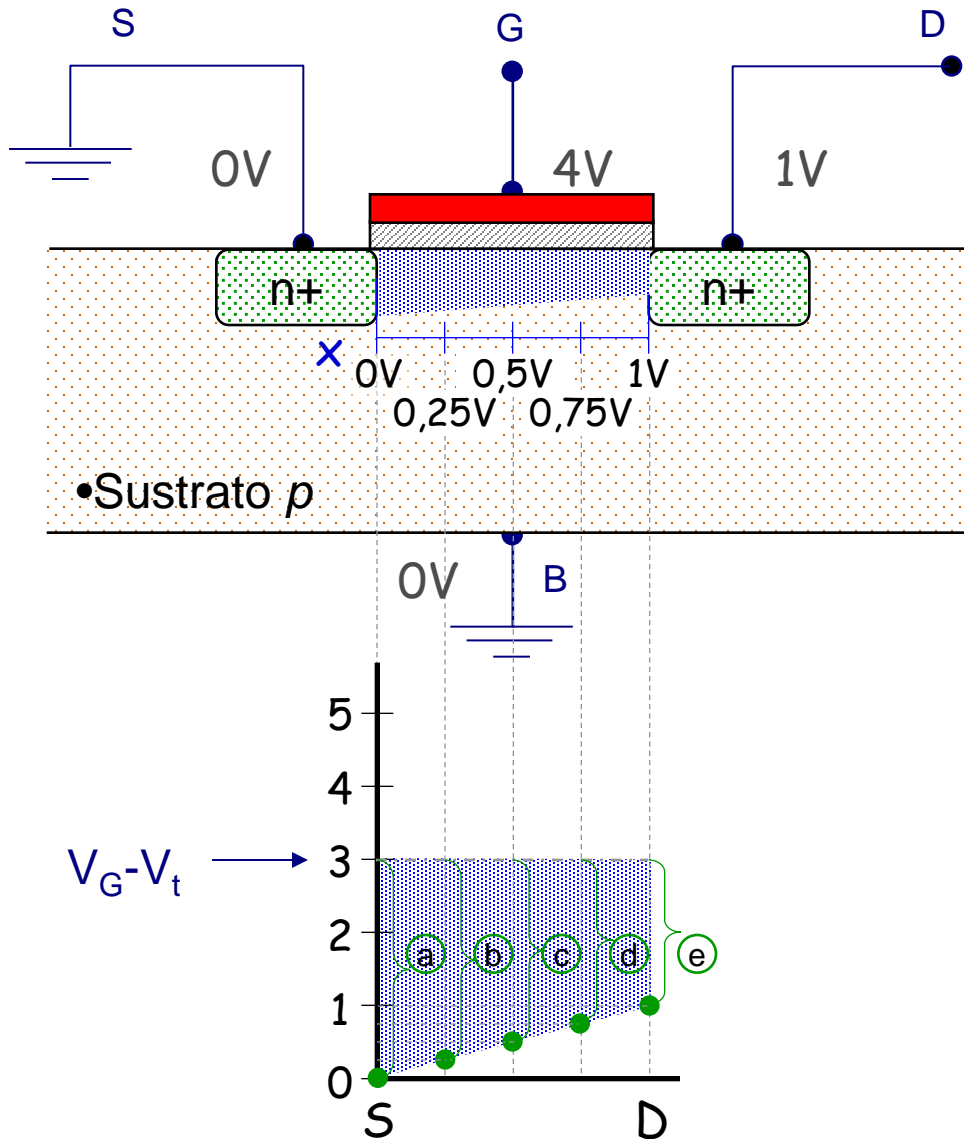


$$V_t = 1V$$

$$(V_G - V_t) - V_x$$

- | | |
|-----|-------------------------------|
| (a) | $3,0V - \mathbf{0,0V} = 3,0V$ |
| (b) | $3,0V - \mathbf{0,0V} = 3,0V$ |
| (c) | $3,0V - \mathbf{0,0V} = 3,0V$ |
| (d) | $3,0V - \mathbf{0,0V} = 3,0V$ |
| (e) | $3,0V - \mathbf{0,0V} = 3,0V$ |

Perfil del canal. Análisis cualitativo (II)

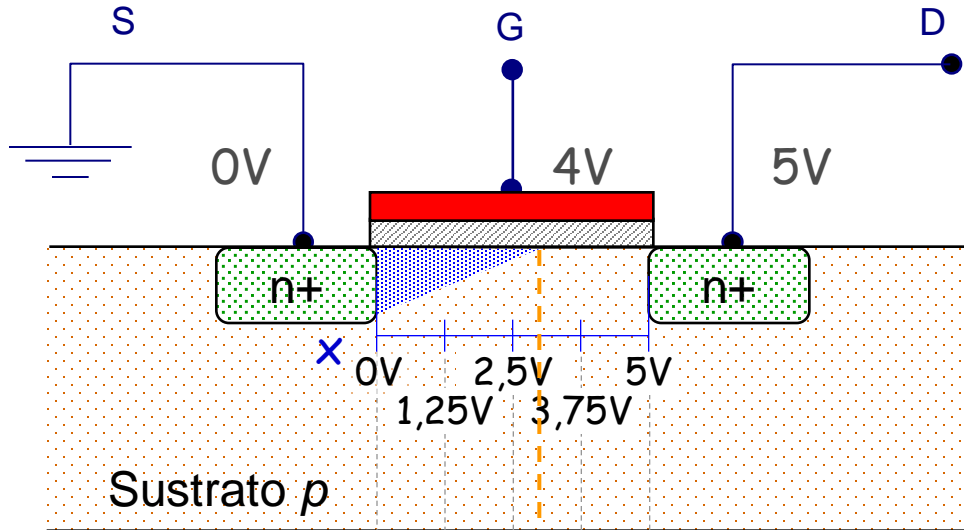


$$V_t = 1V$$

$$(V_G - V_t) - V_x$$

- | | |
|-----|------------------------|
| (a) | $3,0V - 0,00V = 3,00V$ |
| (b) | $3,0V - 0,25V = 2,75V$ |
| (c) | $3,0V - 0,50V = 2,50V$ |
| (d) | $3,0V - 0,75V = 2,25V$ |
| (e) | $3,0V - 1,00V = 2,00V$ |

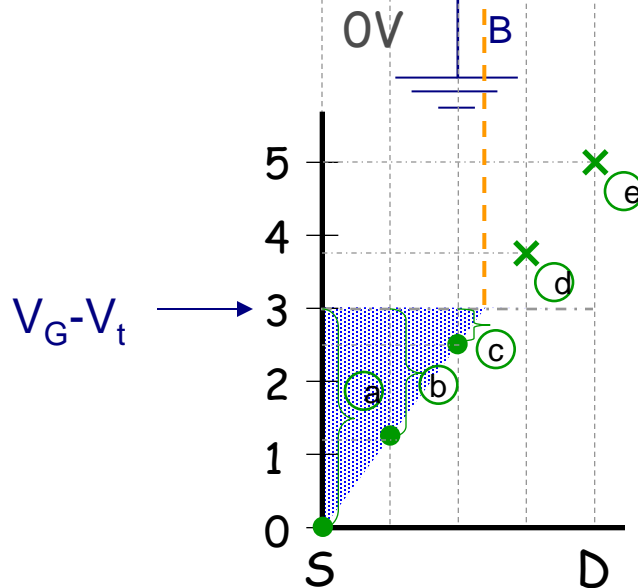
Perfil del canal. Análisis cualitativo (III)



$$V_t = 1V$$

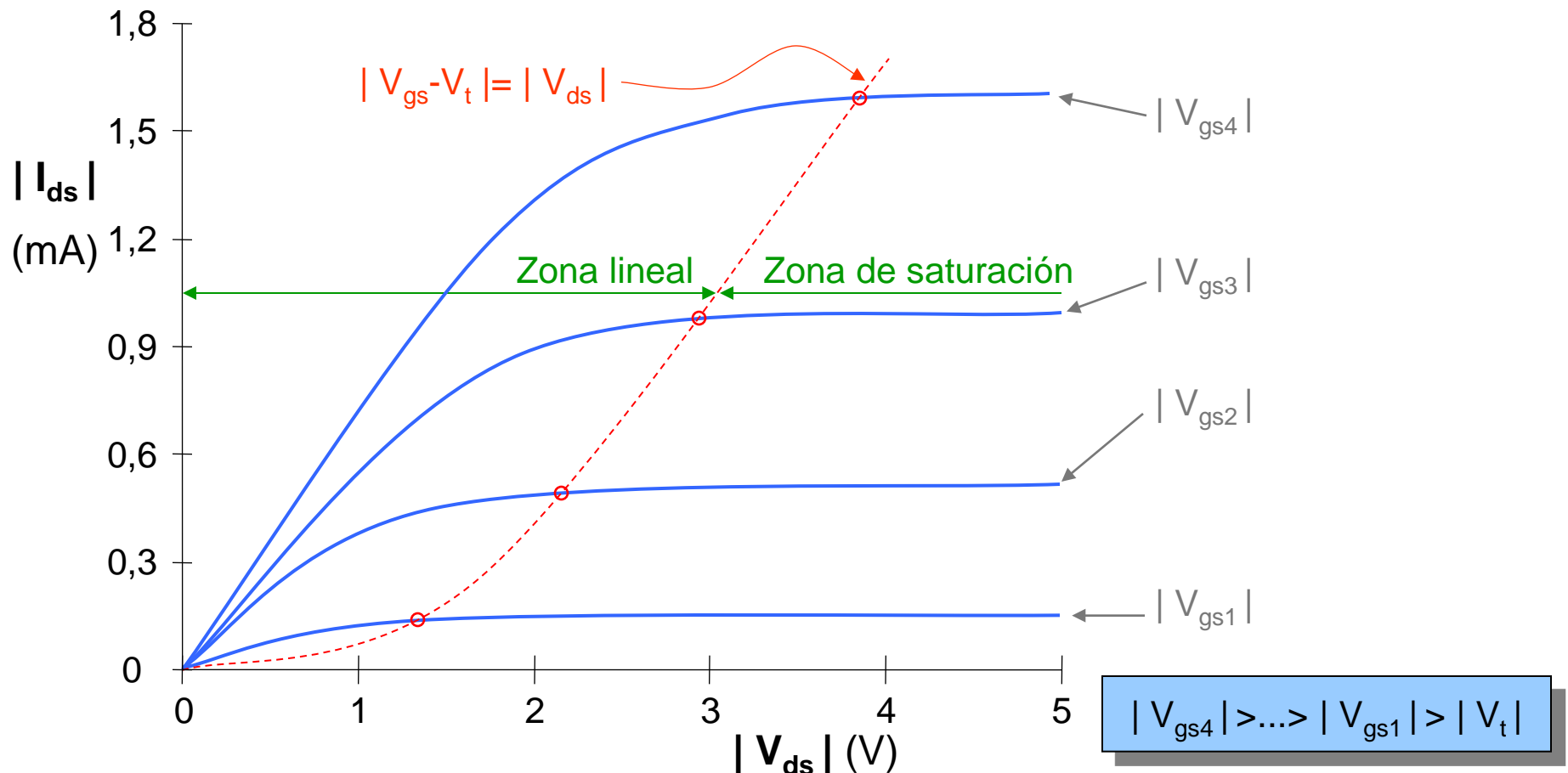
$$(V_G - V_t) - V_x$$

- | | |
|-----|-------------------------|
| (a) | $3,0V - 0,00V = 3,00V$ |
| (b) | $3,0V - 1,25V = 1,75V$ |
| (c) | $3,0V - 2,50V = 0,50V$ |
| (d) | $3,0V - 3,75V = -0,75V$ |
| (e) | $3,0V - 5,00V = -2,00V$ |



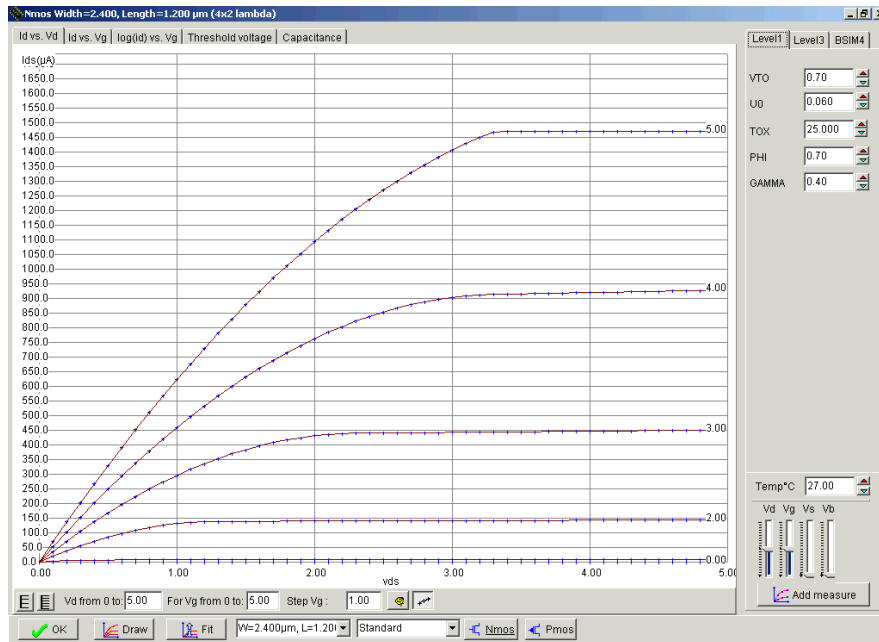
Curvas características de los transistores MOS

- Reflejan la variación de la corriente I_{ds} en función de la tensión V_{ds} para diferentes valores de V_{gs} constantes.

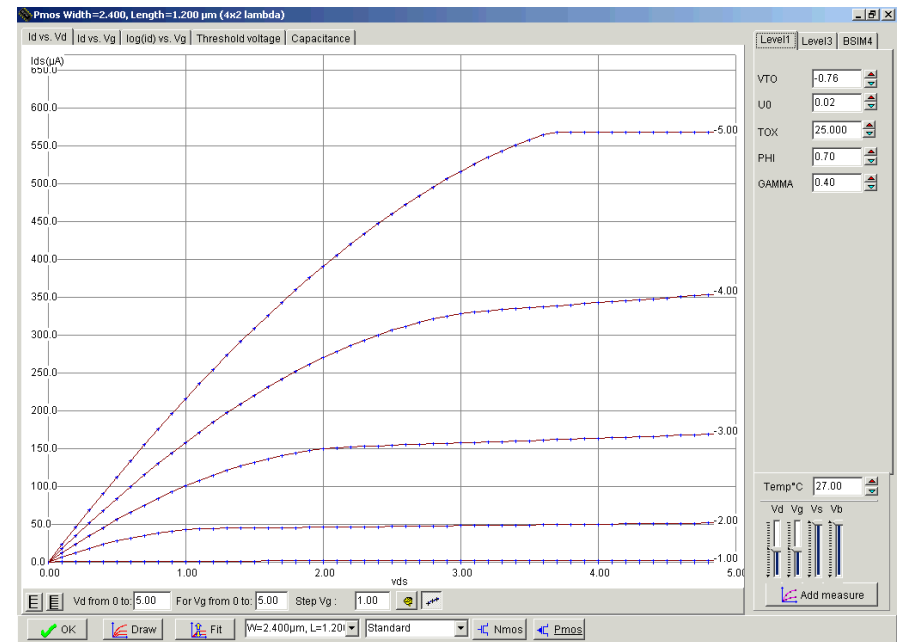


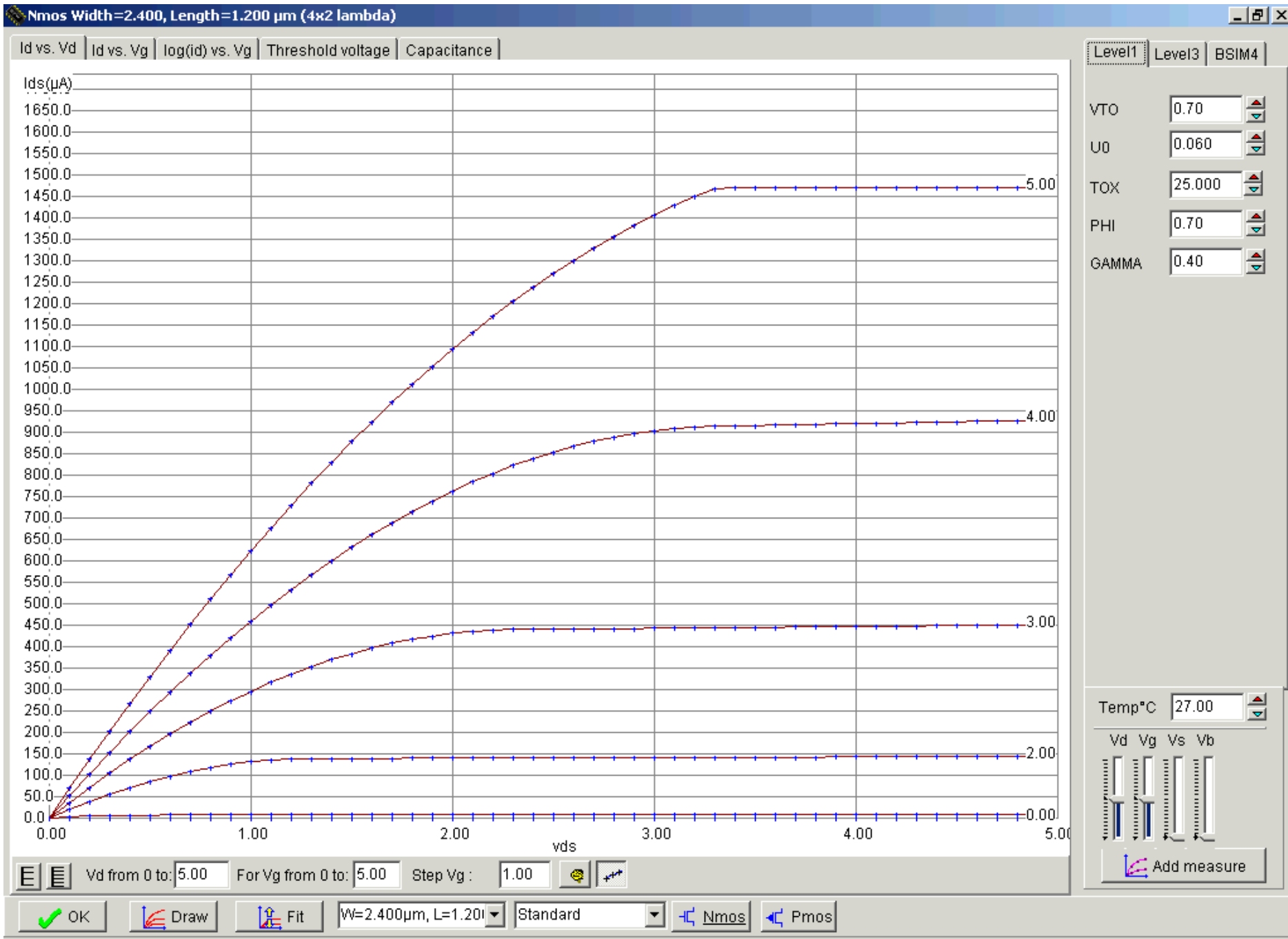
Curvas características de los transistores MOS obtenidas con Microwind-2

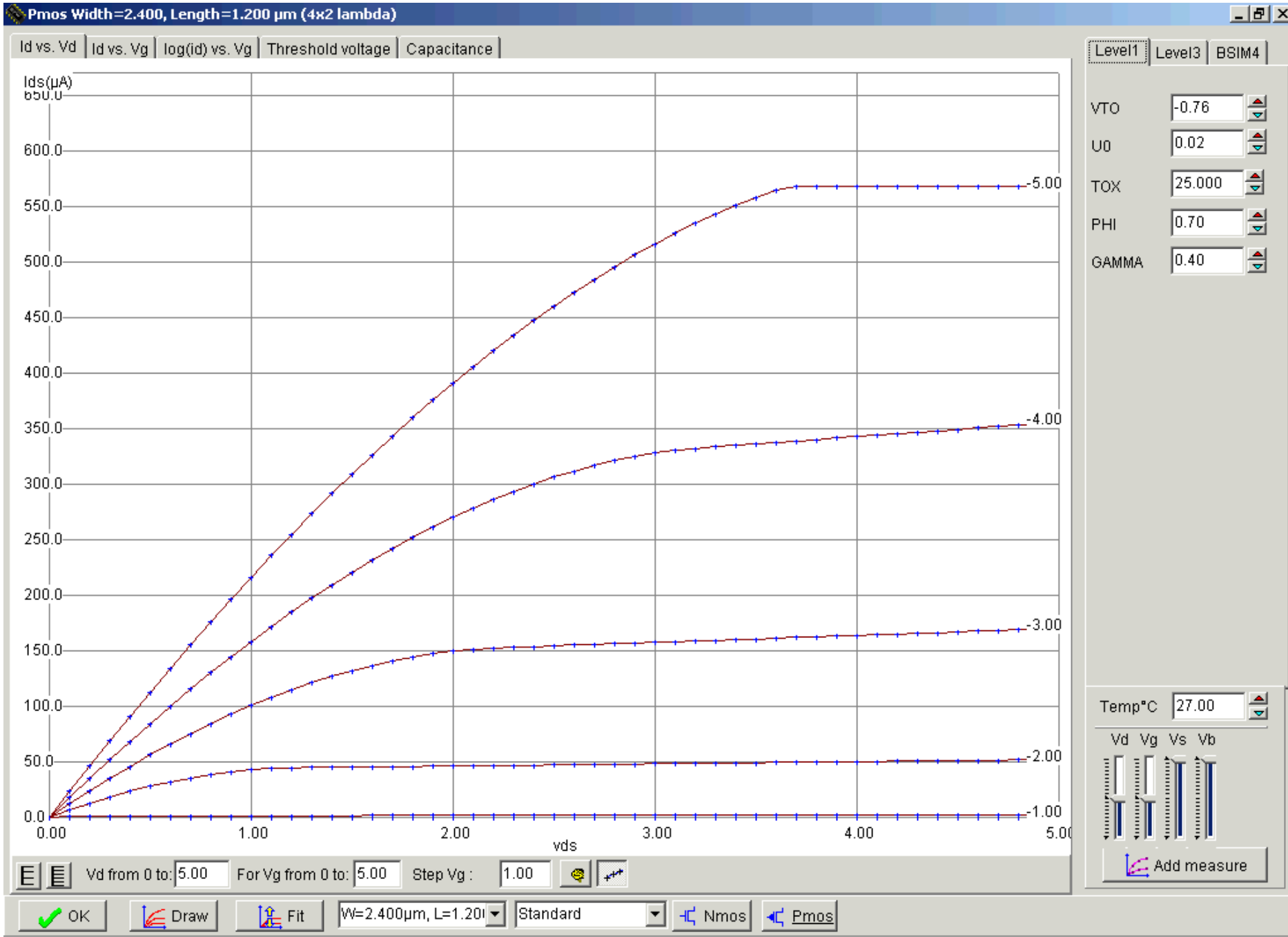
nMOS



pMOS







Modos de operación del transistor MOS y sus ecuaciones (I)

- La ecuación (de primer orden o de nivel 1) que permite describir el comportamiento de la corriente I_{ds} con la tensión V_{ds} de un transistor MOS tiene la forma siguiente:

$$I_{ds} = \beta \left[(V_{gs} - V_t) - \frac{V_{ds}}{2} \right] V_{ds}$$

β es el factor de ganancia del transistor

Modos de operación del transistor MOS y sus ecuaciones (II)

$$\beta = \frac{\mu\epsilon}{t_{ox}} \left(\frac{W}{L} \right) = \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) = K \left(\frac{W}{L} \right)$$

μ - movilidad de los portadores (μ_n o μ_p)

ϵ - permitividad eléctrica del medio (SiO_2)

t_{ox} - espesor de la capa de óxido (SiO_2)

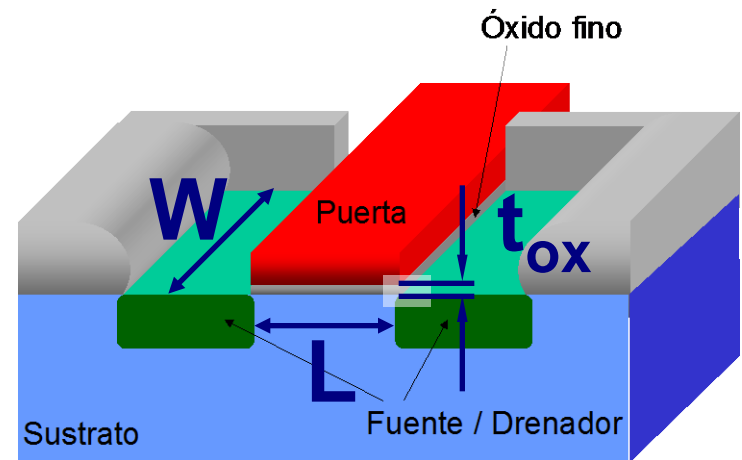
W - ancho del canal

L - longitud del canal

(W/L) - relación de aspecto

$C_{ox} = \epsilon/t_{ox}$ - capacidad de puerta por unidad de área

K - factor dependiente del proceso de fabricación



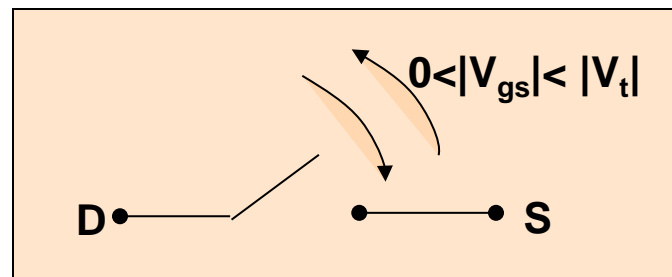
Zonas de funcionamiento del transistor MOS

○ El transistor MOS presenta tres zonas de funcionamiento:

1. Zona de corte o subumbral.
2. Zona lineal u óhmica (no saturada).
3. Zona de saturación.

Zona de corte

- Se produce cuando: $0 < |V_{gs}| < |V_t|$
- No hay canal formado.
 - V_{gs} por debajo de la tensión umbral.
 - Se dice que el transistor está en “OFF” o en corte.
- Se caracteriza por: $I_{ds}=0$
- Modelo equivalente:



Zona de lineal u óhmica (I)

○ Se produce cuando: $|V_{ds}| < |V_{gs} - V_t|$

- Recordando la ecuación del transistor MOS, podemos describirla de la siguiente manera:

$$I_{ds} = \beta \left[(V_{gs} - V_t) - \frac{V_{ds}}{2} \right] V_{ds}$$

$$\frac{V_{ds}}{I_{ds}} = \frac{1}{\beta \left[(V_{gs} - V_t) - \frac{V_{ds}}{2} \right]}$$

- Si asumimos que en esta zona $(V_{ds}/2) \ll (V_{gs} - V_t)$, la expresión del corchete se puede considerar prácticamente constante, por lo que:

Zona de lineal u óhmica (II)

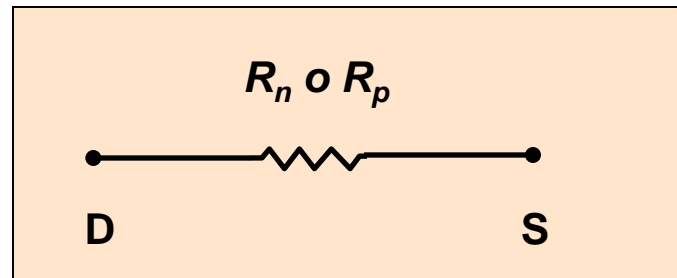
$$\frac{V_{ds}}{I_{ds}} \cong \frac{1}{\beta(V_{gs} - V_t)} = \frac{1}{K\left(\frac{W}{L}\right)(V_{gs} - V_t)} = cte$$

○ De aquí se concluye que en esta zona el transistor se comporta como una resistencia, pudiéndose determinar su valor por:

$$R \cong \left(\frac{L}{W}\right)\left(\frac{1}{K(V_{gs} - V_t)}\right) = cte$$

Zona de lineal u óhmica (III)

○ Modelo equivalente:



para nMOS $\rightarrow R_n$

para pMOS $\rightarrow R_p$

- Nota: esta resistencia será tanto menor cuanto mayor sea la tensión en puerta V_{gs} .

$$R \cong \left(\frac{L}{W} \right) \left(\frac{1}{K(V_{gs} - V_t)} \right) = cte$$

Zona de lineal u óhmica (IV)

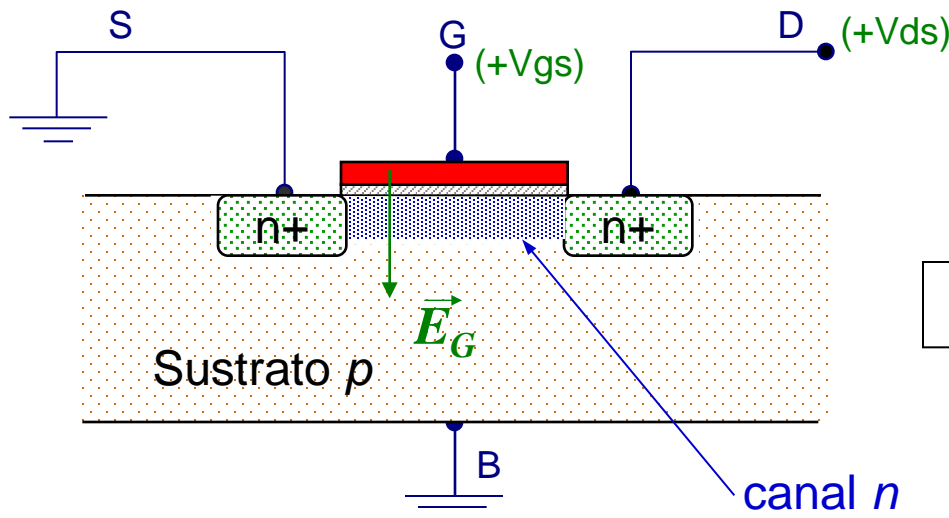
- Un aspecto interesante a considerar es que la movilidad de los huecos μ_p es notoriamente menor que la de los electrones μ_n para el silicio.
 - La ganancia β será casi tres veces menor en un transistor p con respecto al n .
 - Por ello la resistencia de canal R será casi tres veces mayor para las mismas relaciones de aspecto y proceso tecnológico en un transistor tipo p respecto al tipo n .
- En resumen, a igual relación de aspecto los transistores pMOS son sensiblemente más resistivos.
 - Más lentos en la conmutación de una capacidad que los nMOS.

Zona de saturación (I)

- Se produce cuando: $|V_{ds}| > |V_{gs} - V_t|$
- Se caracteriza por: $I_{ds} \approx I_{sat} = cte$
 - Este comportamiento es una consecuencia de la aparición de un fenómeno conocido como “estrangulación del canal” o *pinch-off*.
- Recordemos porqué se produce.

Zona de saturación (II)

- Analicemos la variación del perfil del canal (distribución de los portadores presentes en el canal) a medida que va aumentando la tensión V_{ds} (caso nMOS).

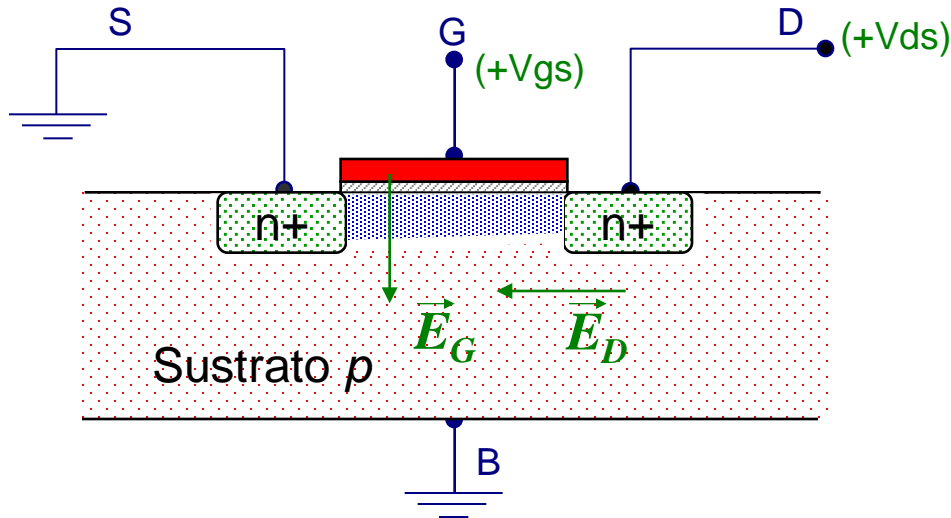


Para $V_{gs} > V_t$ y $V_{ds} = 0$

✓ (Perfil horizontal, distribución uniforme de los portadores en toda la longitud del canal)

Zona de saturación (III)

(Zona lineal u óhmica)



Para $V_{gs} > V_t$ y $V_{ds} < (V_{gs} - V_t)$

\vec{E}_D es débil

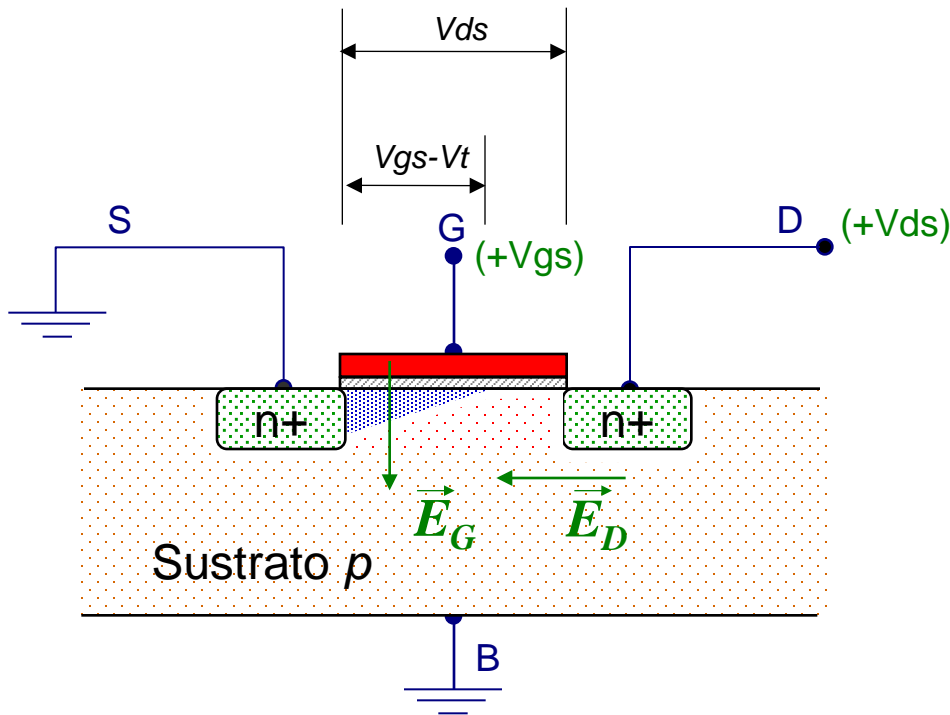
✓ El perfil del canal se va estrechando en dirección al drenador dado que la intensidad del campo \vec{E}_G se va haciendo menor a medida que nos acercamos al drenador.

Zona de saturación (IV)

(Zona de saturación)

Para $V_{gs} > V_t$ y $V_{ds} > (V_{gs} - V_t)$

\vec{E}_D es fuerte



✓ En esta zona, a medida que V_{ds} se hace más grande, mayor será la zona estrangulada del canal pero a su vez el campo \vec{E}_D será más intenso.

⇒ Por tanto el nivel de corriente I_{ds} se mantiene prácticamente constante, es decir, alcanza su nivel de saturación (I_{sat}).

Zona de saturación (V)

- La línea de separación entre la zona lineal y la zona de saturación se alcanza cuando:

$$V_{ds} = (V_{gs} - V_t)$$

- El nivel de corriente será:

$$I_{ds} = \beta \left[(V_{gs} - V_t) - \frac{V_{ds}}{2} \right] V_{ds} = \left[\frac{\beta(V_{gs} - V_t)}{2} \right] (V_{gs} - V_t) = \beta \left[V_{ds} - \frac{V_{ds}}{2} \right] V_{ds}$$

Ecuación de una parábola

$$I_{ds} = \frac{\beta(V_{gs} - V_t)^2}{2} = \frac{\beta V_{ds}^2}{2} \cong cte$$

Zona de saturación (VI)

- Debido a la reducción efectiva que experimenta el canal en la zona saturada, la expresión analítica utilizada para representar el comportamiento del transistor MOS en esta zona tiene la forma:

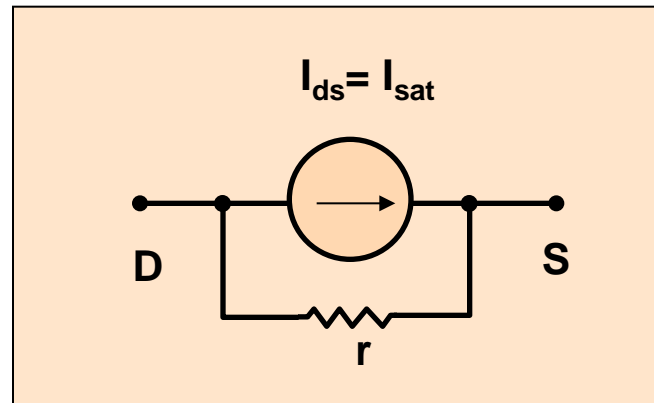
$$I_{ds}(sat) = \frac{\beta}{2} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds}) \cong cte$$

Siendo λ - factor de modulación de la longitud del canal (0,02 - 0,005)

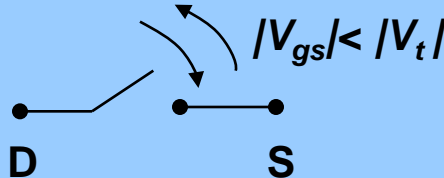
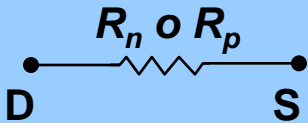
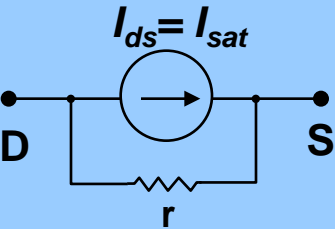
$$I_{ds}(sat) = \frac{K}{2} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds}) \cong cte$$

Zona de saturación (VII)

○ Modelo equivalente.



Modos de funcionamiento de un transistor MOS. Resumen

	nMOS	pMOS	Modelo eléctrico equivalente
Zona de corte	$0 < V_{gs} < V_t$	$0 > V_{gs} > V_t$	
Zona lineal	$V_{ds} < (V_{gs} - V_t)$	$V_{ds} > (V_{gs} - V_t)$	
Zona de saturación	$V_{ds} > (V_{gs} - V_t)$	$V_{ds} < (V_{gs} - V_t)$	

Ecuaciones de un transistor nMOS

Zona de corte

$$0 < V_{gs} < V_t$$

$$I_{ds} = 0$$

Zona lineal

$$\begin{aligned} V_{gs} &> V_t \\ V_{ds} &< (V_{gs} - V_t) \end{aligned}$$

$$I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L} \right) [2(V_{gs} - V_t) - V_{ds}] V_{ds}$$

Zona de saturación

$$\begin{aligned} V_{gs} &> V_t \\ V_{ds} &> (V_{gs} - V_t) \end{aligned}$$

$$I_{ds}(sat) = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

Ecuaciones de un transistor pMOS

Zona de corte

$$0 > V_{gs} > V_t$$

$$I_{ds} = 0$$

Zona lineal

$$\begin{aligned} V_{gs} < V_t \\ V_{ds} > (V_{gs} - V_t) \end{aligned}$$

$$I_{ds} = \frac{\mu_p C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L} \right) [2(V_{gs} - V_t) - V_{ds}] V_{ds}$$

Zona de saturación

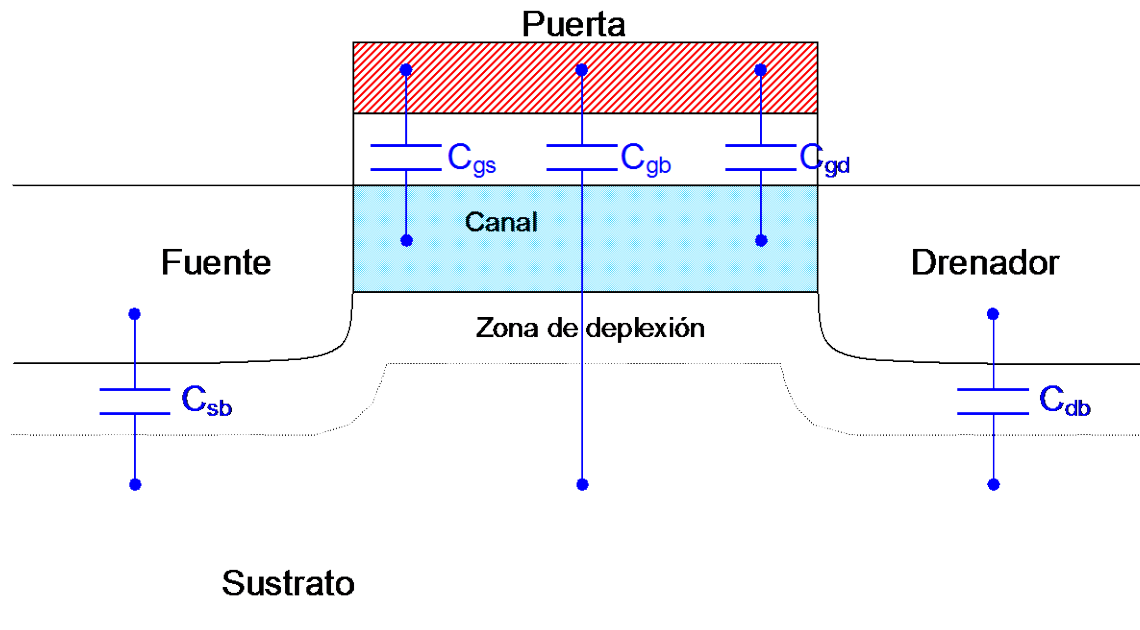
$$\begin{aligned} V_{gs} < V_t \\ V_{ds} < (V_{gs} - V_t) \end{aligned}$$

$$I_{ds}(sat) = \frac{\mu_p C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

Tensión umbral (efecto de sustrato)

- La tensión umbral V_t en un transistor MOS no es fija puesto que depende de la diferencia de voltaje entre el sustrato y la fuente del transistor.
 - A este hecho se le conoce como “efecto de polarización del sustrato” o “efecto de sustrato”.

Capacidades en el transistor MOS (I)



C_{gs}	Capacidad entre puerta y el canal en la zona ligada a la fuente.
C_{gd}	Capacidad entre puerta y el canal en la zona ligada al drenador.
C_{sb}	Capacidad entre la difusión de fuente con el sustrato.
C_{db}	Capacidad entre la difusión de drenador con el sustrato.
C_{gb}	Capacidad de puerta a sustrato.

Capacidades en el transistor MOS (II)

○ Modelo de capacidades.

□ Capacidad de puerta.

- Dos componentes diferenciadas en la capacidad de la puerta: capacidad intrínseca y capacidad extrínseca.

$$C_g(\text{total}) = C_g(\text{intrínseca}) + C_g(\text{extrínseca})$$

- La componente intrínseca es la suma de varias capacidades:

$$C_g(\text{intrínseca}) = C_{gb} + C_{gs} + C_{gd}$$

□ Capacidad de difusión.

- Relacionada con el contacto entre las zonas de difusión de fuente y drenador con el sustrato.

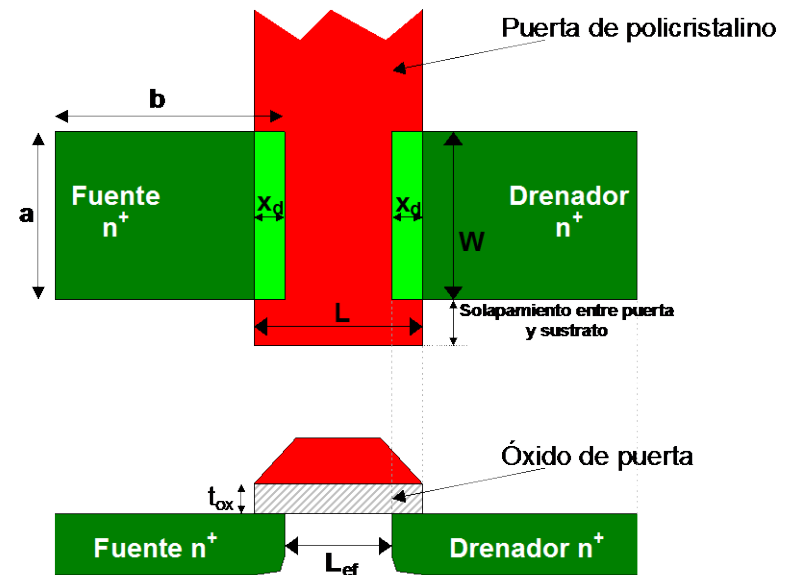
Capacidades en el transistor MOS (III)

○ Capacidad intrínseca.

- La existente cuando $x_d = 0$.
- No existe solapamiento entre la puerta y la fuente o entre la puerta y el drenador.

○ Capacidad extrínseca.

- Aquella componente debida al hecho de que $x_d \neq 0$.
 - Producto de imperfecciones en el proceso de fabricación.



Modelo de capacidades intrínsecas de puerta (I)

○ Su magnitud atendiendo a la zona de funcionamiento del transistor será igual a:

□ Zona de corte y zona lineal:

$$\frac{\varepsilon WL}{t_{ox}} = C_{ox} WL$$

□ Zona saturada:

$$\left(\frac{2}{3} \frac{\varepsilon WL}{t_{ox}}, \quad 0.9 \frac{\varepsilon WL}{t_{ox}} \right)$$

Modelo de capacidades intrínsecas de puerta (II)

○ Aproximación a la capacidad intrínseca de puerta.

<i>Parámetro</i>	<i>Capacidad</i>		
	<i>Zona de corte</i>	<i>Zona lineal</i>	<i>Zona saturada</i>
C_{gb}	$\varepsilon \cdot W \cdot L / t_{ox}$	0	0
C_{gs}	0	$\varepsilon \cdot W \cdot L / 2 \cdot t_{ox}$	$2 \cdot \varepsilon \cdot W \cdot L / 3 \cdot t_{ox}$
C_{gd}	0	$\varepsilon \cdot W \cdot L / 2 \cdot t_{ox}$	0 >0 cuando el canal es corto
$C_g = C_{gb} + C_{gs} + C_{gd}$	$\varepsilon \cdot W \cdot L / t_{ox}$	$\varepsilon \cdot W \cdot L / t_{ox}$	$2 \cdot \varepsilon \cdot W \cdot L / 3 \cdot t_{ox} \rightarrow 0.9 \cdot \varepsilon \cdot W \cdot L / t_{ox}$